干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

近30 a浑善达克沙地沙漠化时空演变特征及驱动机制研究

同丽嘎[1]， 宁小莉[2]， 张 靖[3,4]， 张雪峰[2]

（1. 大连民族大学建筑学院，辽宁 大连 116600；2. 包头师范学院资源与环境学院，内蒙古 包头 014030；3. 大连民族大学环境与资源学院，辽宁 大连 116600；4. 辽宁师范大学地理科学学院，辽宁 大连 116029）

摘 要：浑善达克沙地作为中国北方沙漠化最严重的地区之一，已被列入全国重点生态环境建设地区，其沙漠化发展过程及其影响因素研究具有重要意义。利用1985—2017年浑善达克沙地5期遥感影像数据，通过eCognition 9.0软件，采用面向对象计算机自动分类法，获取沙漠化指数，进行浑善达克沙地沙漠化时空演变特征研究，并利用主成分分析法，进行了沙漠化驱动机制研究。结果表明：近30 a，浑善达克沙地沙漠化土地面积以2002年为转折点呈现先增加后减少的趋势，其中轻度沙漠化土地面积先减少后增加，由42.1%减少到20.9%后又增加到32.1%，主要分布于东部地区；中度沙漠化有逐渐增加的趋势，由20.6%增加到39.0%，分布于中部地区；重度沙漠化土地由30.3%减少到22.6%，而极度沙漠化先增加后减少，由7.0%增加到16.0%后又减少到6.3%，分布于西部及以南逐渐往西北方向移动。沙漠化程度空间上形成由西向东逐渐减轻的趋势。浑善达克沙地沙漠化发展过程受年末总人口、国内生产总值、三次产业、载畜量、耕地面积等人为因素影响较大，自然因素起到辅助作用。因此，沙漠化治理过程中，有效实施退耕还林还草和禁牧、休牧等政策，合理开展治沙防沙工程，进一步改善浑善达克沙地沙漠化，推动区域生态环境的健康发展。

关 键 词：沙漠化；时空特征；驱动机制；浑善达克沙地

文章编号：

1977年联合国召开沙漠化会议以来，沙漠化作为一个生态环境问题被世界所公认[1]。长期以来，全世界110多个国家受沙漠化危害，而中国是世界上受沙漠化危害最严重的国家之一，分布广、面积大是其最主要的特点[2]。沙漠化对中国北方干旱、半干旱地区生态环境和社会经济的影响尤为重要[3-4]。沙漠化(沙质荒漠化)作为极端干旱、干旱、半干旱及部分半湿润地区土地退化过程的典型特征之一[5]，对所在区域生态、水文和农业等方面均造成严重危害，如沙尘暴发生、土壤风蚀、草场退化、耕地生产力下降等，从而严重影响区域社会经济的发展[6]。因此，一直以来沙漠化问题不仅是社会各界广泛关注的焦点，其变化、成因、防治等方面，也是地理学、生态学等学科研究的热点之一。

20世纪50年代，中国科学院初步开展了有关沙漠化的研究工作[7]。1978年，朱震达等[8]首次提出“沙漠化”的概念，并对其定义和形成机理做了系统的阐释。到了20世纪80年代，中国学者们逐步开展了沙漠化相关研究工作，主要围绕沙漠化的成因[9]、空间格局[10-12]、演变过程[13]、防治措施[3,14]和脆弱性评估[15]等方面，其中沙漠化动态监测是其他研究的基础。随着遥感技术的发展，其对地表过程的动态监测方面起到了很重要的作用，从而在沙漠化研究方面也成为主要的监测手段[16]。通过遥感手段，对中国典型的沙漠化地区，如内蒙古阿拉善高原[17]、鄂尔多斯高原[18]、浑善达克沙地[12]、科尔沁沙地[13]以及青藏高原[19]和青海共和盆地[20]等沙漠化地区，进行动态监测的基础上研究其时空格局，从而进一步

收稿日期：2020-05-19； **修订日期**：2020-07-24

基金项目：内蒙古自治区科技计划项目(201605052)；内蒙古自治区高等学校“青年科技英才支持计划”项目(NJYT-19-B31)资助

作者简介：同丽嘎(1983-)，女，博士，副教授，主要从事城市地表过程与人居环境研究. E-mail: tongliga113@126.com

通讯作者：宁小莉(1965-)，女，硕士，教授，主要从事人居环境等方面的研究. E-mail: 1725342463@qq.com

研究其形成机制。而沙漠化驱动因子是分析其演变和防治的前提,通常沙漠化的影响因素主要有自然因素和人为因素两大类[21],采用数理统计方法研究驱动因子与沙漠化之间的关系。常学礼等[22]采用累加效应分析法研究自然因素和人为因素对科尔沁沙地沙漠化的影响,进一步利用3S技术分析了典型地区人工造林对沙漠化过程的影响[23];赵哈林等[24]、王静茹等[25]利用数理统计等方法分别研究了气候变化对北方农牧交错区和科尔沁沙地土地沙漠化的影响;阿如旱等[26]利用Logistic回归模型分析了内蒙古多伦县土地沙漠化驱动因子。而已有的研究,主要进行某一时间点的驱动因子和沙漠化两者之间的关系研究,并采用沙漠化的面积[13,27]、指数[22,28]作为沙漠化程度的评估指标,与已有研究相比,本文数据有所更新、研究跨度有所增加(1985—2017年),且进行多期驱动因子与沙漠化关系研究。

浑善达克沙地处于中国北方典型草原区向旱作农业区过渡地带,是中国北方荒漠化最严重的地区之一[29-30]。作为中国沙尘暴主要沙尘源地之一,国家对浑善达克沙地实施了退耕还林还草、禁牧休牧等治理沙尘源和生态环境恢复的一系列政策,使该地区沙漠化发展势头得到遏制,区域生态环境有所改善[31]。但是,浑善达克沙地生态环境脆弱,加之气候变化较大,不合理的土地利用方式和过度开垦、放牧等现象并没有得到彻底改善,导致该地生态环境仍然面临问题,从而直接影响了社会经济的可持续发展[32]。因此,本文以浑善达克沙地为研究区,利用1985、1992、2002、2011年和2017年等5期的Landsat TM/OLI遥感影像数据为数据源,通过eCognition 9.0软件,采用面向对象计算机自动分类法,以沙漠化差值指数(DDI)作为衡量沙漠化程度的指标,获取研究区沙漠化遥感监测数据,并利用主成分分析方法,进行沙漠化变化过程与自然、人为因素之间的关系研究,进而确定了近30 a来浑善达克沙地沙漠化的时空演化过程和驱动机制,为相关部门进行沙漠化防治和管理等工作提供科学借鉴。

1 研究区概况

浑善达克沙地地处内蒙古自治区锡林郭勒大草原南端,东部从大兴安岭的南段西麓,西部延伸至集二铁路沿线以西,东西宽约473 km,南北宽50~100 km,地理位置为111°27′34.2″~117°10′46.9″ E,41°10′10.5″~42°58′30.7″ N,总面积为41639.7 km^2;包括隶属与锡林郭勒盟的苏尼特右旗、苏尼特左旗、阿巴嘎旗、镶黄旗、正镶白旗、锡林浩特市、多伦县和正蓝旗等8个旗县和赤峰市内的克什克腾旗1个旗县(市)[33](图1);属于中温带半干旱、干旱大陆性季风气候区[30],据1985—2017年12个气象站观测数据,年平均气温1.5~5.0 ℃,年降水量200~400 mm,自西北向东南逐渐增多,主要集中在7—9月,年均风速2.7~3.5 $m\cdot s^{-1}$,年最大风速6.5~8.0 $m\cdot s^{-1}$,夏季炎热少雨,冬季寒冷多风;地带性土壤为栗钙土,非地带性土壤主要有风沙土、盐碱土和草甸土;植被以大针茅(*Stipa grandis*)、克氏针茅(*Stipa krylovii*)、羊草(*Leymus chinensis*)、冰草(*Agropyron cristatum*)地带性植被和榆树(*Ulmus pumila*)、锦鸡儿(*Caragana sinica*)、柽柳(*Tamarix chinensis*)、黄柳(*Salix gordejevii*)、差巴嘎蒿(*Artemisia halodendron*)等沙地植被为主。

2 数据来源和研究方法

2.1 数据来源和预处理

2.1.1 遥感影像数据 沙漠化遥感监测数据来源于Landsat5 TM/Landsat8 OLI传感器数据,由美国地质调查局(United States Geological Survey,https://glovis.usgs.gov/)下载获取,根据最早数据的可获得性可追溯到1982年,同时考虑约10 a的时间间隔,分别选取1985、1992、2002、2011年4期的Landsat 5 TM数据(多光谱波段分辨率30 m)和2017年的Landsat 8 OLI数据(多光谱波段分辨率30 m,全色波段分辨率15 m)。遥感影像主要选取植被生长季(7—9月),且云量覆盖小于10%的影像,并补充了少数非生长季和其他可以反映不同类型地物差异的影像数据。覆盖整个浑善达克沙地需要6景数据,获取1985—2017年5个时期Landsat TM/OLI数据共30景。

使用ArcGIS 10.3和ENVI 5.3软件对数据进行几何校正、辐射校正、大气校正、投影转换和镶嵌等预处理,并利用浑善达克沙地矢量边界进行数据裁剪。

沙漠化遥感监测分类方法采用面向对象计算机自动分类方法[34],并以沙漠化差值指数(DDI)作

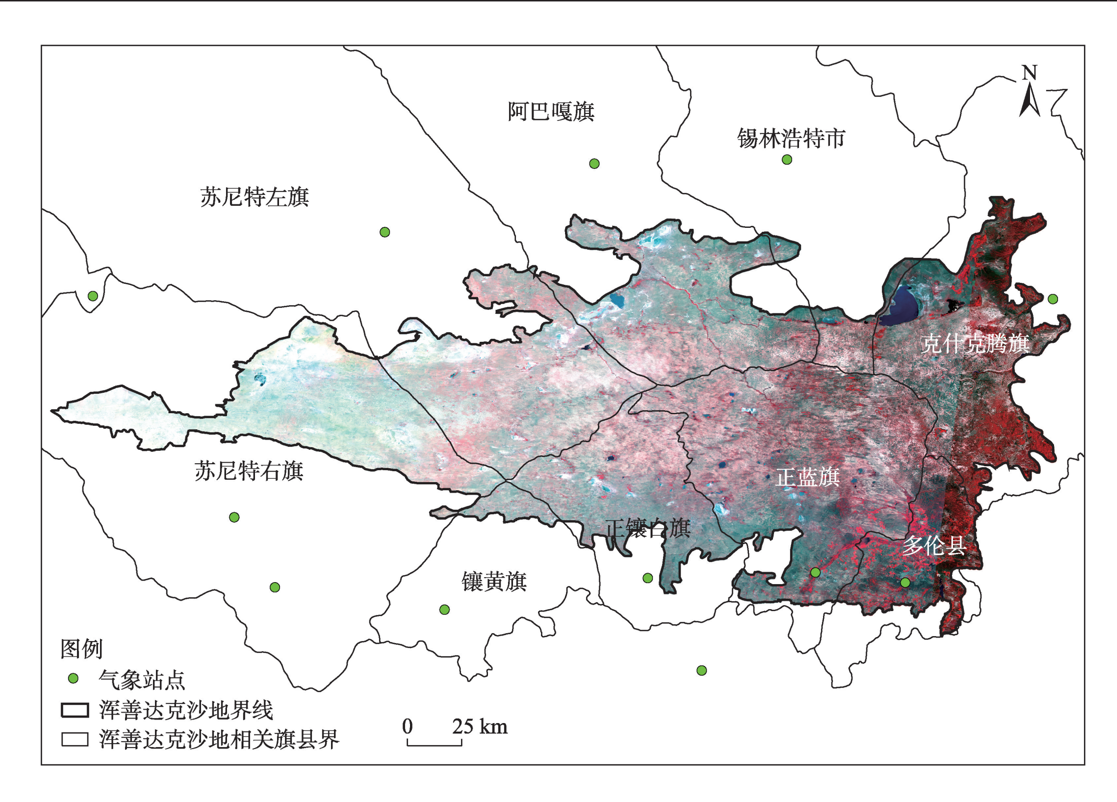


图1 浑善达克沙地示意图

Fig. 1 Hunshandake Sandy Land range map

为衡量沙漠化程度的指标,获取研究区沙漠化遥感监测数据,在此基础上结合野外调查和高分一号(GF1)数据进行数据结果验证,精度达到90%以上。

2.1.2 驱动因子数据 1985—2017年浑善达克沙地气象数据从国家气象信息中心获取,包括年平均气温、年降水量、年平均风速和年最大风速等指标;1986—2017年的人口数据、载畜量、耕地面积、国内生产总值和三次产业等数据主要由内蒙古历年统计年鉴获取。

2.1.3 沙漠化等级划分 根据Liu等[34]对沙漠化指数的判别标准和分类方法,将1985—2017年不同时期浑善达克沙地的沙漠化指数划分成非沙漠化、轻度、中度、重度、极度等5个等级,如表1所示。

表1 沙漠化等级划分表

Tab. 1 Desertification classification table

类别	SDI值
极度沙漠化土地	SDI≤0.3730
重度沙漠化土地	0.3730<SDI≤0.4965
中度沙漠化土地	0.4965<SDI≤0.6414
轻度沙漠化土地	0.6414<SDI≤0.8024
非沙漠化土地	0.8024<SDI≤1.0977

注:SDI为沙漠化指数。

2.2 研究方法

通过面向对象分类方法,提取沙漠化相关数据,该方法除了考虑影像的波段、纹理等信息以外,还有陆地和水体指数、归一化植被指数、Albedo等表征特定地物的指数[34]。

2.2.1 陆地和水体指数(Land and water index, LWI)

$$LWI = Infra - RED/(GREEN + 0.0001) \times 100 \quad (1)$$

式中:Infra-RED、GREEN分别为红外、绿光波段,分别对应Landsat TM图像的第5、2波段和Landsat OLI图像的第6、3波段。

2.2.2 沙漠化差值指数(Desertification difference index, DDI) NDVI与植被覆盖度成正比,而Albedo与植被覆盖度成反比,即Albedo和NDVI两者间呈负相关关系,说明NDVI值的减少使沙漠化程度增加,而Albedo值的增加使沙漠化程度也随着增加,即沙漠化程度可以由Albedo NDVI的一元线性回归表达式反映。DDI可以构建为[35]:

$$DDI = 2.234 \times NDVI - Albedo \quad (2)$$

式中:NDVI由公式(3)计算,Albedo由公式(4)、(5)计算。

2.2.3 ***归一化植被指数*(Normalized difference vegetation index, NDVI)** NDVI主要应用于监测植被生长状态、植被覆盖度和消除部分辐射误差等，NDVI计算公式为：

$$NDVI = (NIR - RED)/(NIR + RED) \quad (3)$$

式中：NIR和RED分别为近红外、红光波段，分别对应Landsat TM图像的第4、3波段和Landsat OLI图像的第5、4波段。

2.2.4 Albedo Landsat TM/OLI反照率的转化使用的是Liang等[36-37]研究的算法计算，公式如下：

$$Albedo(TM) = 0.356 \times b1 + 0.130 \times b3 + 0.373 \times b4 + 0.085 \times b5 + 0.072 \times b7 - 0.0018 \quad (4)$$

$$Albedo(OLI) = 0.356 \times b2 + 0.130 \times b4 + 0.373 \times b5 + 0.085 \times b6 + 0.072 \times b7 - 0.0018 \quad (5)$$

式中：b1、b2、b3、b4、b5、b6、b7分别对应Landsat TM/OLI的1–7波段。

2.2.5 ***沙漠化驱动因素分析*** 沙漠化受自然和人为双重因素的影响，是多个因素综合作用的过程。自然因素选取浑善达克沙地范围内旗县和周边共12个气象站点1985—2017年的年降水量、年平均气温、年平均风速、年最大风速等气象指标，采用ArcGIS 10.3克里金插值法对12个站点的数据进行差值，并通过统计计算，获取浑善达克沙地其他旗县的气象数据。人为因素选取1986—2017年的耕地面积、载畜量及人口数量、国内生产总值和三次产业数据等。由于自然因素对沙漠化的影响是个漫长的过程[22]，因此，针对自然因素进行了滑动平均处理(1~10 a)，获取与DDI关联度最高的平均值结果。在此基础上，文章采用主成分分析法进行浑善达克沙地沙漠化驱动机制分析。该方法不仅能简化多个变量，还能量化沙漠化驱动因素中多个因素的贡献率，并揭示沙漠化过程的主要驱动力[34]。文章中选取的主要自然和人为影响因素为年降水量($X1$)、年平均气温($X2$)、年平均风速($X3$)、年最大风速($X4$)、年末总人口($X5$)、耕地面积($X6$)、载畜量($X7$)、国内生产总值($X8$)、第一产业($X9$)、第二产业($X10$)和第三产业($X11$)。

2.3 数据精度验证

文章采用高分辨率数据(GF1)以及野外采样点(30个)来评价浑善达克沙地沙漠化遥感监测数据的质量。以2017年的数据为例，根据野外采样点的分布情况，计算高分一号(GF1)影像的NDVI值，然后转换成植被盖度，根据沙漠化指标分级标准评价各个采样点土地的沙漠化程度。在Landsat影像范围选取各级别沙漠化验证点，与本数据集所得到的结果进行比较，并计算Kappa系数。经验证，2种分辨率的数据评价结果基本一致，总体精度达到90%以上，反映出本文的数据在区域尺度上评价浑善达克沙地沙漠化具有可行性。

3 结果与分析

3.1 浑善达克沙地沙漠化时空演化特征

3.1.1 ***沙漠化土地面积时空变化分析*** 近30 a浑善达克沙地沙漠化土地以2002年为转折点总体上呈现出先增加后减少的变化趋势，其中轻度沙漠化土地面积先减少后增加，中度沙漠化土地面积呈现逐渐增加的趋势，重度和极度沙漠化土地面积呈现先增加后减少，与沙漠化总体变化趋势一致(图2)。

1985—2002年间，浑善达克沙地沙漠化土地面积从36940.0 km^{2}增长到38259.7 km^2，其中轻度沙漠化面积有明显减少趋势，从占总沙漠化土地面积的42.1%减少到20.9%，而中度和极度沙漠化土地面积增加显著，分别从20.6%、7.0%增加到33.5%、16.0%，重度沙漠化土地面积有所增加，从11195.3 km^{2}增加到11350.9 km^2，但所占总沙漠化土地面积比例反而有所减少，从30.3%减少到29.7%；2002—2017年间，沙漠化土地面积从38259.7 km^{2}减少到35968.2 km^2，其中重度、极度沙漠化土地面积明显减少，分别从占29.7%、16.0%减少到22.6%、6.3%，

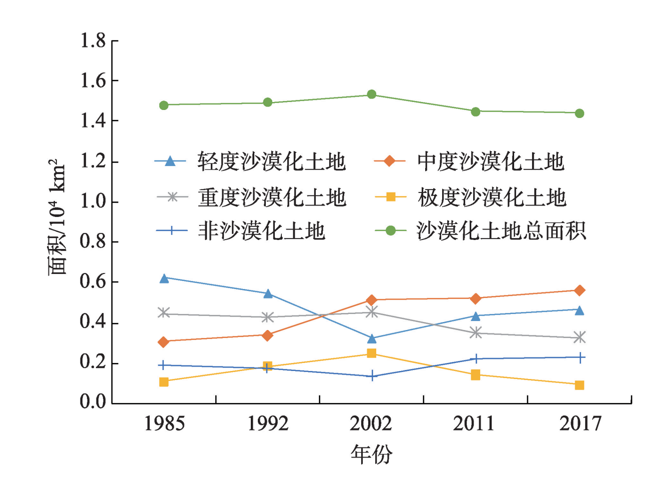


图2 1985—2017年浑善达克沙地沙漠化土地面积变化

Fig. 2 Changes of desertification land areas of Hunshandake Sand Land from1985 to 2017

而重度、极度沙漠化转为中度和轻度沙漠化，因此轻度、中度沙漠化面积增长显著，分别增长3542.7 km²、1224.6 km²，所占比例分别增长到32.1%、39.0%。

浑善达克沙地沙漠化程度空间分布呈现由西向东逐渐减轻的趋势，重度沙漠化土地主要分布于西部（苏尼特右旗中东部、苏尼特左旗西南部、正镶白旗西部地区和镶黄旗北部小部分地区），极度沙漠化土地从西部以南逐渐往西北方向移动（苏尼特右旗中至东部），中度沙漠化土地主要分布于中部地区（正镶白旗中北部、苏尼特左旗东南部、阿巴嘎旗南部和正蓝旗西部地区），轻度沙漠化土地主要分布于东部地区（正蓝旗中至东部大部分地区、锡林浩特市南部小部分地区、克什克腾旗西部和多伦县西北部等地区），而非沙漠化土地分布于东部和东北地区（科什克腾旗中部和多伦县东部地区）（图3）。

3.1.2 沙漠化土地转移变化分析 根据浑善达克沙地沙漠化转移矩阵（表2），1985—2017年间，以2002年为转折点浑善达克沙地沙漠化面积呈现先增加后减少的趋势，其中极度、重度沙漠化分别逆向转化为重度、中度沙漠化面积明显要大于正向的转化。其中1985—2002年间，轻、中、重度沙漠化分别转化为中、重和极度沙漠化面积达到9031.1 km²、5117.1 km²、5065.6 km²，非沙漠化土地面积减少达到3469.4 km²。显然，浑善达克沙地低级别沙漠化往高级别逐级转化现象非常显著，沙漠化面积扩大，总体有明显加重趋势；2002—2017年，重、极度沙漠化都有所减轻，重度变为中度沙漠化面积达到8396.3 km²，极度转化为重度沙漠化土地面积为4514 km²，轻度沙漠化土地面积增加2124.1 km²，非沙漠化土地面积增加1002.1 km²，该时期浑善达克沙地沙漠化程度有明显好转趋势。

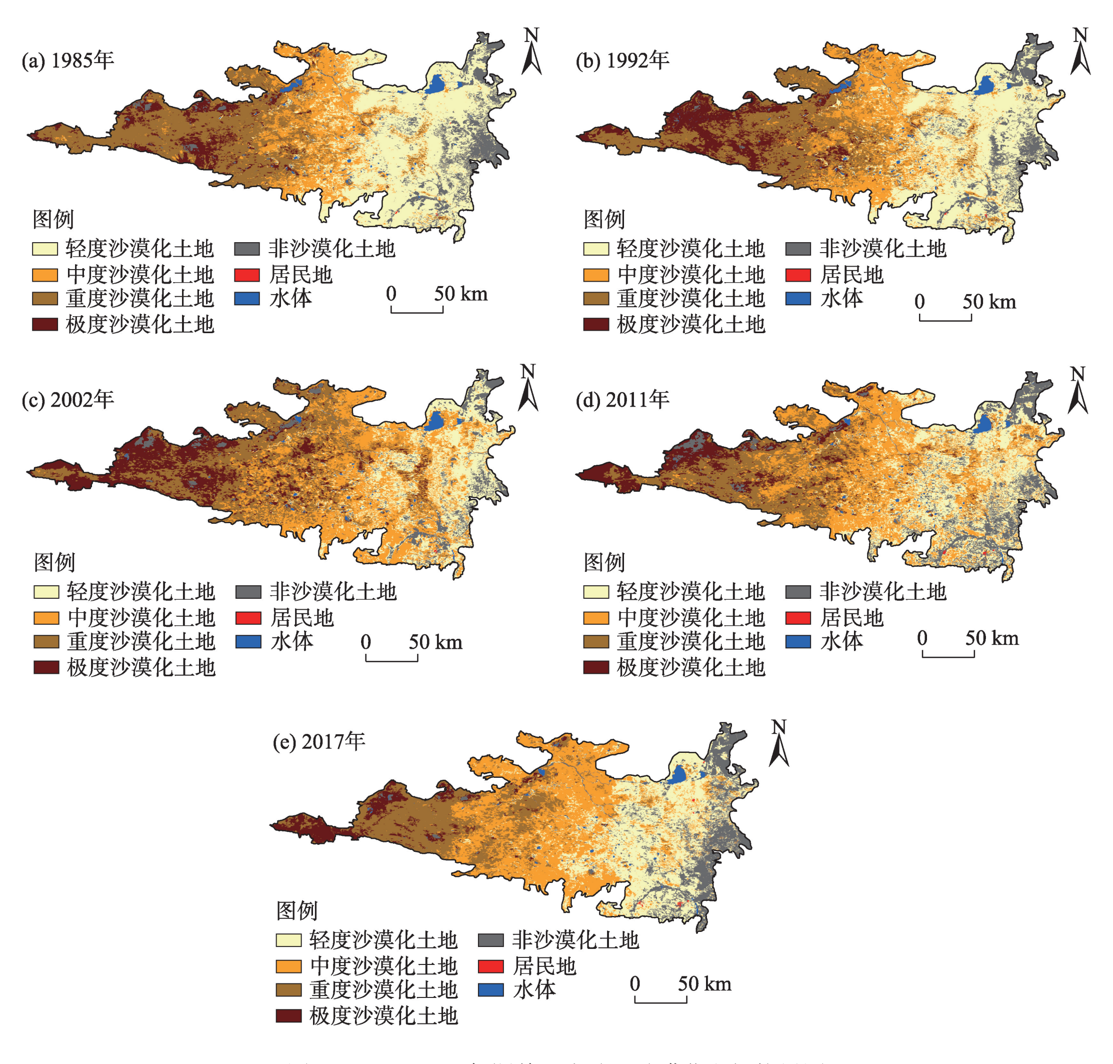


图3 1985—2017年浑善达克沙地沙漠化空间格局图

Fig. 3 Spatial pattern of desertification in Hunshandake Sandy Land from 1985 to 2017

表2 1985—2017年浑善达克沙地沙漠化转移矩阵

Tab. 2 Transition matrix of desertification in Hunshandake Sandy Land from 1985 to 2017 /km²

类型	轻度沙漠化土地	中度沙漠化土地	重度沙漠化土地	极度沙漠化土地	非沙漠化土地	总计
轻度沙漠化土地	9282.6	3802.8	233.0	2.2	2239.1	15559.7
中度沙漠化土地	1056.9	5439.5	1002.3	40.1	55.4	7594.2
重度沙漠化土地	273.4	4341.8	5342.4	1201.7	35.9	11195.2
极度沙漠化土地	8.3	305.5	1397.5	849.5	30.1	2590.9
非沙漠化土地	919.4	142.8	136.1	190.4	3311.4	4700.1
总计	11540.6	14032.4	8111.3	2283.9	5671.9	41640.1

近30 a来，浑善达克沙地沙漠化面积的变化主要与内蒙古总体荒漠化治理政策相关。从20世纪50年代开始，内蒙古党委、政府发布相关荒漠化防治政策文件，主要内容为保护森林、防止滥砍盗伐、禁止盲目开荒等。20世纪90年代开始，荒漠化防治工作真正进入全面实施阶段，结合国家生态环境建设工程，从农业、林业、畜牧业以及土地资源等多方面进行荒漠化综合防治工作。因此，从2002年开始，浑善达克沙地沙漠化程度开始有所好转，且沙漠化面积逐渐有减少的趋势。

3.2 浑善达克沙地沙漠化成因

3.2.1 *沙漠化影响因子分析* 在影响沙漠化的自然因子中，气温、降水量、风速等气候因子与沙漠化之间的关系较密切[38]。近30 a，浑善达克沙地年平均气温和降水量变化波动较大，总体上呈现增长趋势，其中年平均气温为(3.5±0.8) ℃，从1997年开始有所增长，年降水量为(291.7±51.5) mm，在1992—1998年和2012—2017年2个时期增长趋势明显。而浑善达克沙地年平均风速为(3.2±0.2) m·s^{-1}，年最大风速为(7.3±0.5) m·s^{-1}，基本处于平稳状态(图4)。

在影响沙漠化的人为因素中，主要选取了年末总人口、耕地面积、载畜量及国民经济相关指标，这些指标作为沙漠化发生和发展的主要内容。近30 a来，浑善达克沙地耕地面积呈现先增长(1988—2000年)后下降(2000—2005年)最后趋于平稳变化的趋势。而载畜量变化波动较大，总体呈现先增长后急剧下降(1999—2001年，由135.5×10⁴只下降到87.8×10⁴只)并逐渐趋于稳定状态。该变化与1980

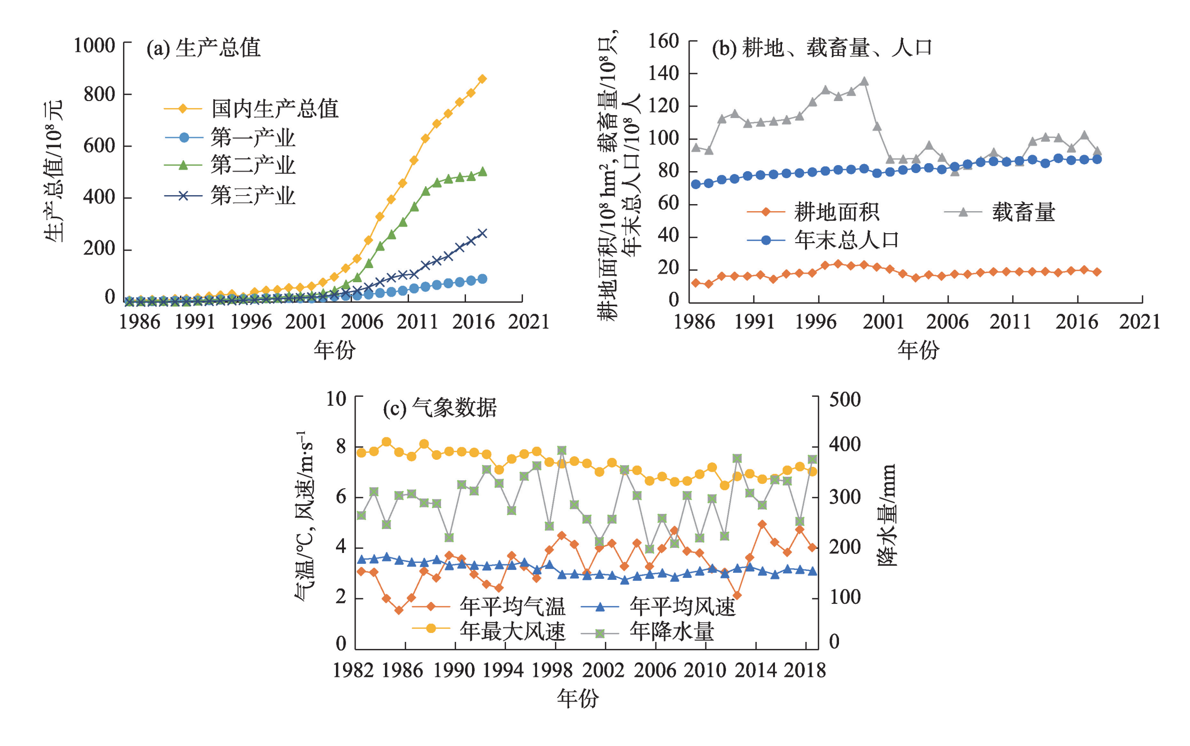


图4 1985—2017年浑善达克沙地沙漠化驱动因子

Fig. 4 Driving factors of desertification in Hunshandake Sandy Land from 1985 to 2017

年国家实施的农村土地承包责任制和1999年开始实施的退耕还林还草、围封禁牧等政策相对应。浑善达克沙地人口呈现缓慢平稳增长的趋势，国内生产总值、三次产业变化趋势较明显，从2005年开始出现明显增长趋势。

气候因素对沙漠化的影响是一个漫长的过程，因此先对年平均气温、年降水量、年平均风速和年最大风速等自然因子进行了1~10 a的滑动平均值计算，并与DDI之间进行了关联分析，最后得到年平均气温、年降水量、年平均风速2 a累加效应和年最大风速8 a累加效应与沙漠化程度关联性较高。

3.2.2 近30 a浑善达克沙地沙漠化驱动因子分析 根据11个驱动因子，年降水量(*X*1)、年平均气温(*X*2)、年平均风速(*X*3)、年最大风速(*X*4)、年末总人口(*X*5)、耕地面积(*X*6)、载畜量(*X*7)、国内生产总值(*X*8)、第一产业(*X*9)、第二产业(*X*10)和第三产业(*X*11)，针对浑善达克沙地近30 a的因子数据进行主成分分析，选取特征根大于1，累计贡献率大于85.0%的主成分因子进行主成分载荷分析，11个影响因子中，前3个主成分累计贡献率达到89.9%，各主成分的贡献率分别为56.6%、17.8%、15.4%(表3)。

在第一主成分中，变量的贡献率为56.6%，其中年最大风速(*X*4)、年末总人口(*X*5)、国内生产总值(*X*8)、第一产业(*X*9)、第二产业(*X*10)和第三产业(*X*11)的载荷较高。显然，第一主成分是以人为因素为主，其中年末总人口、国内生产总值和三次产业等因子对沙漠化的发展过程起到正向作用。第二主成分中，年降水量(*X*1)、年平均风速(*X*3)、载畜量(*X*7)等3个因子贡献较大，其中年降水量的贡献最大，表明该主成分以自然因子为主；第三主成分中，年平均气温(*X*2)、年平均风速(*X*3)等自然因子和耕地面积(*X*6)、载畜量(*X*7)等人为因子贡献较大，且自然因子和人为因子对该主成分的贡献率约相当。综合来看，在1985—2017年间浑善达克沙地沙漠化过程受人为因素影响较大(第一主成分贡献率最高)，自然因素也起到一定辅助作用。

表3 1985—2017年浑善达克沙地沙漠化驱动因子主成分分析(载荷矩阵)

Tab. 3 Principal component analysis of driving factors (load matric) of desertification in Hunshandake Sandy Land from 1985 to 2017

变量	PC1	PC2	PC3
年降水量(*X*1)	-0.125	0.851	0.079
年平均气温(*X*2)	0.547	-0.286	0.612
年平均风速(*X*3)	-0.542	0.553	-0.458
年最大风速(*X*4)	-0.957	0.134	-0.018
年末总人口(*X*5)	0.968	-0.013	0.160
耕地面积(*X*6)	0.319	0.293	0.803
载畜量(*X*7)	-0.476	0.694	0.498
国内生产总值(*X*8)	0.930	0.248	-0.232
第一产业(*X*9)	0.960	0.217	-0.125
第二产业(*X*10)	0.898	0.290	-0.261
第三产业(*X*11)	0.917	0.263	-0.211
特征根	6.226	1.959	1.691
贡献率/%	56.600	17.800	15.400
累计贡献率/%	56.600	74.400	89.800

注：PC1、PC2、PC3分别为第一、第二、第三主成分。

4 讨论

浑善达克沙地作为中国北方荒漠化最严重的地区之一，已被列入全国重点生态环境建设地区。文章利用1985—2017年浑善达克沙地5期遥感影像数据，通过eCognition 9.0和ArcGIS 10.3等专业软件，进行沙漠化指数的提取，并利用主成分分析法研究沙漠化变化影响因子，明确了近30 a浑善达克沙地沙漠化时空演变过程及其驱动机制。近30 a浑善达克沙地沙漠化土地面积以2002年为转折点呈现先增长后下降的趋势，其中重度和极度沙漠化土地面积明显减少，总体上由恶化变好转。银山[39]通过MODIS数据进行了1989—2007年浑善达克沙地荒漠化动态研究，发现以2000年为转折点出现先恶化后改善的趋势，本文结论进一步验证了该结果。而浑善达克沙地沙漠化变化主要受人为因素影响，自然因素也起到辅助的作用。随着人口数量的不断增长，农牧业活动变得频繁，1980年以来，中国实施土地联产承包责任制，各地出现大范围开荒、垦种现象，一方面提高了农业生产产量，提高了国内生产总值，但另一方面盲目的开垦和不合理的土地利用，使得生态脆弱的农牧交错区域生态环境不断恶化。1988年开始浑善达克沙地耕地面积急剧增加，比1987年约增加了479 km^2，粮食种植面积扩大，草场被占为耕地的同时，草场载畜量也明显增加，同期约增加19.32×10^4只，因此受人口、国内生产总值和产业发展等人为因素的影响，使得其沙漠化面积不断增加，沙漠化程度不断加重。到了2000

年，围封禁牧和退耕还林还草等政策的实施以及"三北防护林"生态工程的初步成效，浑善达克沙地载畜量和耕地面积急剧减少，土地承载力下降，使得土地沙漠化明显减缓，成为沙漠化土地由恶化变好的转折点。显然，人为因素在土地沙漠化逆转过程中起着决定性的作用。王涛等[40]研究科尔沁地区沙漠化过程驱动因素中，也得出自2000年以后国家实施的生态环境保护政策，加强对区域生态环境的保护和重建力度，使得林地和草地面积增加，土地沙漠化面积明显减少，加之载畜量的降低，减轻了对草场的破坏，沙漠化呈现逆转趋势。岳喜元等[41]进行科尔沁沙地沙漠化风险评价中也得出相同的结论。自然因素中，1980年以来浑善达克沙地年平均气温变化不是很大，范围在1.5~4.9 ℃，平均值3.5 ℃；年降水量波动变化较大，范围约在200~400 mm之间，平均值约290 mm，2000年后呈现波动增长趋势；年平均风速和最大风速有所降低，且年降水量相对于年平均气温对土地沙漠化的影响较大，年降水量的增加和风速的降低有助于植被的生长和土地沙漠化的稳定，在一定程度上对土地沙漠化起到缓解作用。这与李春兰等[42]进行的气候波动下浑善达克沙地荒漠化动态变化分析结果是一致的。元志辉等[43]通过研究2000—2014年间浑善达克沙地植被覆盖度变化，得出NDVI年际变化与降水量的关系较密切（R^2达到0.75），这从另一方面说明了降水量对土地沙漠化的缓解作用。

在浑善达克沙地沙漠化驱动因素中，年末总人口、国内生产总值、三次产业、载畜量、耕地面积等是沙漠化的主要影响因素，而年降水量的增加和年平均风速的降低在一定程度上对土地沙漠化起到缓解作用，其他因子对沙漠化土地影响较小。而在浑善达克沙地沙漠化的治理过程中，控制牲畜头数，限制耕地面积的继续增长，实施退耕还林还草和禁牧、休牧等政策，并通过现代化技术提高农牧业产量，保证经济增长的同时，合理开展治沙防沙工程，进一步改善浑善达克沙地沙漠化程度，提高区域生态环境质量。

5 结 论

本文以浑善达克沙地为研究区，利用5期影像数据，进行时空特征分析的基础上进一步完成沙漠化驱动机制研究。结果如下：

（1）时间上，近30 a，浑善达克沙地沙漠化土地以2002年为转折点总体上呈现先增加后减少的趋势，其中重度、极度沙漠化面积先增加后减少，分别由占沙漠化面积的29.7%、16.0%减少到22.6%、6.3%，轻度和中度沙漠化土地面积都有所增加，分别由20.9%、20.6%增加到32.1%、39.0%，在整个沙漠化土地中所占比例较大。

（2）空间上，浑善达克沙地沙漠化土地呈现由西向东逐渐减轻的趋势，其中重度沙漠化土地主要分布于西部，极度沙漠化土地从西部以南逐渐往西北方向移动，中度沙漠化土地主要分布于中部地区，轻度沙漠化土地主要分布于东部地区，非沙漠化土地分布于东部和东北地区，占总土地面积比例由8.1%增加到13.6%。

（3）浑善达克沙地沙漠化的发展受人为因素影响较大，自然因素对其也有一定辅助的作用。而人为因素中年末总人口、国内生产总值、三次产业对主成分的贡献率均高于0.9，而载畜量和耕地面积贡献率也分别达到0.694、0.803，对沙漠化土地的影响较显著；自然因素中年降水量的增加和风速的降低对土地沙漠化也起到一定程度的缓解作用，年降水量和年最大风速对主成分的贡献率分别达到0.851、0.957。而1980年实施的土地联产承包责任制和2000年以后国家实施的一系列生态环境保护政策对浑善达克沙地沙漠化土地由增长到缓解变化起到关键的作用。

参考文献（References）

[1] 张建香, 张多勇, 刘万锋, 等. 基于ESAI的黄土高原荒漠化风险评估[J]. 水土保持通报, 2017, 37(2): 339-344. [Zhang Jianxiang, Zhang Duoyong, Liu Wanfeng, et al. ESAI based assessment of desertification risk in Loess Plateau[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(2): 339-344.]

[2] 王涛, 朱震达, 赵哈林. 中国沙漠化研究的若干问题——4. 沙漠化的防治战略与途径[J]. 中国沙漠, 2004, 24(2): 115-123. [Wang Tao, Zhu Zhenda, Zhao Halin. Study on sandy desertification in China: 4. Strategy and approach for combating sandy desertification[J]. Journal of Desert Research, 2004, 24(2): 115-123.]

[3] 王涛. 荒漠化治理中生态系统、社会经济系统协调发展问题探析——以中国北方半干旱荒漠区沙漠化防治为例[J]. 生态学报, 2016, 36(22): 7045-7048. [Wang Tao. Study on the coordinated development of ecosystem and socio-economic system in desertification control: A case study of desertification control in semiarid

area in north China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(22): 7045-7048.]

[4] Li J C, Liu H X, Su X H, et al. Changes in wind activity from 1957 to 2011 and their possible influence on aeolian desertification in northern China[J]. Journal of Arid Land, 2015(7): 755-764.

[5] 王涛, 宋翔, 颜长珍, 等. 近35 a来中国北方土地沙漠化趋势的遥感分析[J]. 中国沙漠, 2011, 31(6): 1351-1356. [Wang Tao, Song Xiang, Yan Changzhen, et al. Remote sensing analysis on aeolian desertification trends in northern China during 1975—2010[J]. Journal of Desert Research, 2011, 31(6): 1351-1356.]

[6] Zhang J, Niu J M, Bao T, et al. Human induced dryland degradation in Ordos Plateau, China, revealed by multilevel statistical modeling of normalized difference vegetation index and rainfall time-series[J]. Journal of Arid Land, 2014, 6(2): 219-229.

[7] 中国科学院林业土壤研究所编译. 固沙造林资料译丛(第一辑)[M]. 北京: 科学出版社, 1957: 10-45. [Compiled by Institute of Forestry Soil, Chinese Academy of Sciences. Translation of sand fixation and afforestation materials (Part 1)[M]. Beijing: Science Press, 1957: 10-45.]

[8] 朱震达, 刘恕. 就历史时期沙漠化产生原因谈自然资源保护[J]. 环境科学, 1978, 3(6): 29-32. [Zhu Zhenda, Liu Shu. On the protection of natural resources based on the causes of desertification in historical period[J]. Environmental Science, 1978, 3(6): 29-32.]

[9] 陈长委, 伍永秋, 谭利华, 等. 青藏铁路错那湖段沙漠化土地变化及成因分析[J]. 干旱区地理, 2019, 42(4): 885-892. [Chen Changwei, Wu Yongqiu, Tan Lihua, et al. Desertified land change and its causes in Co Nag Lake region along Qinghai-Tibet Railway [J]. Arid Land Geography, 2019, 42(4): 885-892.]

[10] 王涛, 吴薇, 薛娴, 等. 近50年来中国北方沙漠化土地的时空变化[J]. 地理学报, 2004, 59(2): 203-212. [Wang Tao, Wu Wei, Xue Xian, et al. Spatial-temporal changes of sandy desetified land during last 5 decades in northorn China[J]. Acta Geographica Sinica, 2004, 59(2): 203-212.]

[11] Yan C Z, Wang T, Song X, et al. Temporal and spatial changes in the pattern of sandy desert and sandy land in northern China from 1975 to 2010 based on an analysis of Landsat images[J]. International Journal of Remote Sensing, 2017, 38(12): 3551-3563.

[12] 胡日娜, 哈斯额尔敦, 浩毕斯哈拉图, 等. 浑善达克沙地东南缘固定沙丘风蚀坑动态变化[J]. 中国沙漠, 2019, 39(1): 34-43. [Hurina, Hasi Eerdun, Haobisi Halatu, et al. Dynamic changes of blowouts on fixed sand dunes in the southeastern fringe of Otindag Sandy Land[J]. Journal of Desert Research, 2019, 39(1): 34-43.]

[13] 段翰晨, 王涛, 薛娴, 等. 科尔沁沙地沙漠化时空演变及其景观格局——以内蒙古自治区奈曼旗为例[J]. 地理学报, 2012, 67(7): 917-928. [Duan Hanchen, Wang Tao, Xue Xian, et al. Spatial-temporal evolution of aeolian desertification and landscape pattern in Horqin Sandy Land: A case study of Naiman Banner in Inner Mongolia[J]. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(7): 917-928.]

[14] Feng Q, Tian Y Z, Yu T F, et al. Combating desertification through economic development in northwestern China[J]. Land Degradation & Development, 2019(2): 910-917.

[15] 赵志荣, 许端阳, 张绪教, 等. 2000—2015年内蒙古地区土地沙漠化脆弱性评估[J]. 水土保持研究, 2020, 27(1): 168-175. [Zhao Zhirong, Xu Duanyang, Zhang Xujiao, et al. Assessment of the land desertification vulnerability in Inner Mongolia during the period 2000—2015[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(1): 168-175.]

[16] 彭佳忆, 王新军, 朱磊, 等. 基于无人机影像的荒漠地表类型信息提取[J]. 干旱区研究, 2019, 36(3): 771-780. [Peng Jiayi, Wang Xinjun, Zhu Lei, et al. Information extraction of desert surface types based on UAV image[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(3): 771-780.]

[17] 万炜, 颜长珍, 肖生春, 等. 1975—2015年阿拉善高原沙漠化过程、格局与驱动机制[J]. 中国沙漠, 2018, 38(1): 17-29. [Wan Wei, Yan Changzhen, Xiao Shengchun, et al. Process, spatial pattern and driving mechanisms of the aeolian desertification in the Alxa Plateau from 1975 to 2015[J]. Journal of Desert Research, 2018, 38(1): 17-29.]

[18] 冯坤, 颜长珍, 谢家丽, 等. 1975—2015年鄂尔多斯市沙漠化的时空演变过程[J]. 中国沙漠, 2018, 38(2): 233-242. [Feng Kun, Yan Changzhen, Xie Jiali, et al. Spatial-temporal evolution of aeolian deseitification process of Ordos City during 1975—2015[J]. Journal of Desert Research, 2018, 38(2): 233-242.]

[19] 李庆, 张春来, 周娜, 等. 青藏高原沙漠化土地空间分布及区划[J]. 中国沙漠, 2018, 38(4): 690-700. [Li Qing, Zhang Chunlai, Zhou Na, et al. Spatial distribution of aeolian desertification on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Journal of Desert Research, 2018, 38(4): 690-700.]

[20] 李晓英, 姚正毅, 董治宝. 青海省共和盆地沙漠化驱动机制[J]. 水土保持通报, 2018, 38(6): 337-344. [Li Xiaoying, Yao Zhengyi, Dong Zhibao. Driving mechanism of aeolian desertificaton in Gonghe Basin of Qinghai Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(6): 337-344.]

[21] Xu D, Song A, Tong H, et al. A spatial system dynamic model for regional desertification simulation: A case study of Ordos, China [J]. Environmental Modelling & Software, 2016, 83: 179-192.

[22] 常学礼, 赵学勇, 韩珍喜, 等. 科尔沁沙地自然与人为因素对沙漠化影响的累加效应分析[J]. 中国沙漠, 2005, 25(4): 467-471. [Chang Xueli, Zhao Xueyong, Han Zhenxi, et al. Cumulative impacts of human activities and natural elements on desertification in Horqin Sand Land[J]. Journal of Desert Research, 2005, 25(4): 467-471.]

[23] 常学礼, 蔡明玉, 张继平, 等. 科尔沁沙地典型地区人工造林对沙漠化过程的影响[J]. 中国沙漠, 2009, 29(4): 611-616. [Chang Xueli, Cai Mingyu, Zhang Jiping, et al. Effect of artificial forestation on desertification in typical area of Horqin Sandy Land[J]. Journal of Desert Research, 2009, 29(4): 611-616.]

[24] 赵哈林, 张铜会, 崔建垣, 等. 近40 a中国北方农牧交错区气候变化及其与土地沙漠化的关系——以科尔沁沙地为例[J]. 中国沙漠, 2000, 20(增刊1): 1-6. [Zhao Halin, Zhang Tonghui, Cui

Jianyuan, et al. Effect of climatic changes on environment and agriculture in the past 40 years in interlaced agro-pasturing areas of north China: A case study in Horqin Sand Land[J]. Journal of Desert Research, 2000, 20(Suppl. 1): 1-6.]

[25] 王静茹, 马龙, 刘廷玺. 1951—2012年科尔沁沙地气温、降水变化特征[J]. 干旱区研究, 2016, 33(1): 49-58. [Wang Jingru, Ma Long, Liu Tingxi. Variation of temperature and precipitation in Horqin Sandy Land from 1951 to 2012[J]. Arid Zone Research, 2016, 33(1): 49-58.]

[26] 阿如旱, 都来, 盛艳, 等. 基于Logistic回归模型的内蒙古多伦县土地沙漠化驱动力分析[J]. 干旱区地理, 2019, 42(1): 137-143. [Aruhan, Dulai, Sheng Yan, et al. Driving forces on land desertification in Duolun County Inner Mongolia based on Logistic regress model[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(1): 137-143.]

[27] 胡梦珺, 潘宁惠, 李向锋, 等. 1964—2014年玛曲高原土地沙漠化驱动力定量分析[J]. 水土保持通报, 2016, 36(4): 250-256. [Hu Mengjun, Pan Ninghui, Li Xiangfeng, et al. Quantitative analysis of driving forces to land desertification in Maqu Plateau during 1964—2014[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2016, 36(4): 250-256.]

[28] 刘树林, 王涛, 屈建军, 等. 中国北方草原沙漠化发展过程及其成因分析——以内蒙古苏尼特左旗为例[J]. 中国沙漠, 2009, 29(2): 206-211. [Liu Shulin, Wang Tao, Qu Jianjun, et al. Aeolian desertification development of grassland in the northern China and its causes: A case study of Sonid Zuoqi[J]. Journal of Desert Research, 2009, 29(2): 206-211.]

[29] Hu Y, Zhang Y. Using ^{137}Cs and $^{210}Pb_{ex}$ to investigate the soil erosion and accumulation moduli on the southern margin of the Hunshandake Sandy Land in Inner Mongolia[J]. Journal of Geographical Sciences, 2019, 29(10): 1655-1669.

[30] 赵媛媛, 武海岩, 丁国栋, 等. 浑善达克沙地土地沙漠化研究进展[J]. 中国沙漠, 2020, 40(5): 102-112. [Zhao Yuanyuan, Wu Haiyan, Ding Guodong, et al. A review on the aeolian desertification in the Otindag Sandy Land[J]. Journal of Desert Research, 2020, 40(5): 102-112.]

[31] Yang X, Scuderi L A, Wang X C. Groundwater sapping as the cause of irreversible desertification of Hunshandake Sandy Lands, Inner Mongolia, northern China[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2015, 112 (3): 702-706.

[32] 于娜, 赵媛媛, 丁国栋, 等. 基于生态足迹的中国四大沙地地区可持续评价[J]. 干旱区地理, 2018, 41(6): 1310-1320. [Yu Na, Zhao Yuanyuan, Ding Guodong, et al. Sustainability assessment in four sandy lands of China based on the ecological footprint model [J]. Arid Land Geography, 2018, 41(6): 1310-1320.]

[33] 迟妍妍, 许开鹏, 张惠远. 浑善达克沙漠化防治区生态安全评价与对策[J]. 干旱区研究, 2015, 32(5): 1024-1031. [Chi Yanyan, Xu Kaipeng, Zhang Huiyuan. Ecological security assessment and countermeasures of Hunshandake desertification control regions [J]. Arid Zone Research, 2015, 32(5): 1024-1031.]

[34] Liu Q, Zhang Q, Yan Y, et al. Ecological restoration is the dominant driver of the recent reversal of desertification in the Mu Us Desert (China)[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 268: 122241, doi: 10.1016/j.jdepro.2020.122241.

[35] Liu Q, Zhao Y, Zhang X, et al. Spatiotemporal patterns of desertification dynamics and desertification effects on ecosystem services in the Mu Us Desert in China[J]. Sustainability, 2018, 10(3): 589, doi: 10.3390/su10030589.

[36] Liang S. Narrowband to broadband conversions of land surface albedo I: Algorithms[J]. Remote Sensing of Environment, 2001, 76 (2): 213-238.

[37] Liang S, Shuey C J, Russ A L, et al. Narrowband to broadband conversions of land surface albedo: II. Validation[J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 84(1): 25-41.

[38] 董光荣, 申建友, 金炯. 试论全球气候变化与沙漠化的关系[J]. 第四纪研究, 1990(1): 91-98. [Dong Guangrong, Shen Jianyou, Jin Jiong. On the relationship between the global climate change and desertification[J]. Quaternary Sciences, 1990(1): 91-98.]

[39] 银山. 内蒙古浑善达克沙地荒漠化动态研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2010. [Yin Shan. Dynamic study of desertification in Hunshandake Sandy Land of Inner Mongolia[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2010.]

[40] 王涛, 吴薇, 赵哈林, 等. 科尔沁地区现代沙漠化过程的驱动因素分析[J]. 中国沙漠, 2004, 24(5): 519-528. [Wang Tao, Wu Wei, Zhao Halin, et al. Analyses on driving factors to sandy desertification process in Horqin Region, China[J]. Journal of Desert Research, 2004, 24(5): 519-528.]

[41] 岳喜元, 左小安, 赵学勇, 等. 科尔沁沙地沙漠化风险评价[J]. 中国沙漠, 2018, 38(1): 8-16. [Yue Xiyuan, Zuo Xiao'an, Zhao Xueyong, et al. Desertification risk assessment in Horqin Sandy Land[J]. Journal of Desert Research, 2018, 38(1): 8-16.]

[42] 李春兰, 朝鲁门, 包玉海, 等. 21世纪初期气候波动下浑善达克沙地荒漠化动态变化分析[J]. 干旱区地理, 2015, 38(3): 557-564. [Li Chunlan, Chao Lumen, Bao Yuhai, et al. Dynamic changes of desertification in the Hunshandake Desert under the climate fluctuation in early 21st century[J]. Arid Land Geography, 2015, 38(3): 557-564.]

[43] 元志辉, 包刚, 银山, 等. 2000—2014年浑善达克沙地植被覆盖变化研究[J]. 草业学报, 2016, 25(1): 33-46. [Yuan Zhihui, Bao Gang, Yin Shan, et al. Vegetation changes in Otindag Sandy country during 2000—2014[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2016, 25(1): 33-46.]

Spatial-temporal variation and driving mechanism of desertification in Hunshandake (Otindag) Sandy Land in recent 30 years

TONG Liga[1], NING Xiaoli[2], ZHANG Jing[3,4], ZHANG Xuefeng[2]

(1. College of Architecture, Dalian Minzu University, Dalian 116600, Liaoning, China; 2. College of Resources and Environment, Baotou Normal College, Baotou 014030, Inner Mongolia, China; 3. College of Environment and Resources, Dalian Minzu University, Dalian 116600, Liaoning, China; 4. School of Geography, Liaoning Normal University, Dalian 116029, Liaoning, China)

Abstract: The Hunshandake Sandy Land, as one of the most serious desertification areas in northern China, has been listed as a national key ecological environment construction area. A series of policies to control sand dust sources and restore the ecological environment in the Hunshandake Sandy Land has been implemented, such as returning farmland to forest and grassland and forbidding and restricting grazing, so as to curb the development momentum of desertification and improve the regional ecological environment. However, the ecological environment of the Hunshandake Sandy Land is fragile and, coupled with significant climate change, unreasonable land use patterns, excessive reclamation, grazing, and other phenomena, has not completely improved, resulting in the ecological environment of the area still facing problems. Therefore, it is of great significance to study the process of desertification and its influencing factors. The desertification index was calculated and the spatial-temporal evolution characteristics of desertification were studied in five remote sensing imagery periods of the Hunshandake Sandy Land from 1985 to 2017 using eCognition 9.0 and an object-oriented computer automatic classification method; further, the driving mechanism of desertification was studied using principal component analysis. In this paper, the research period of the Hunshandake Sandy Land desertification has been extended, the data have been updated (desertification data for 2017 were added), and the driving mechanism research has been synchronized with the desertification cycle. The results show that the desertification land area of the Hunshandake Sandy Land increased and then decreased over the last 30 years, with a turning point in 2002. The area of mild desertification first decreased and then increased (from 42.1% to 20.9% and then to 32.1%), mainly in the east. Moderate desertification tended to increase gradually (from 20.6% to 39.0%) and is distributed in the central region. However, severe desertification decreased from 30.3% to 22.6%. Extreme desertification first increased and then decreased, increasing from 7.0% to 16.0% and then decreasing to 6.3%, and is distributed in the west and southwest and has gradually moved to the northwest. Overall, the spatial distribution of the desertification degree decreases from west to east. The development process of desertification in the Hunshandake Sandy Land has been greatly influenced by human factors, while natural factors play an auxiliary role. Of the human factors, the contribution rate of total population, GDP, and three industries to the principal component is higher than 0.9, while the contribution rates of the livestock carrying capacity and cultivated land area have reached 0.694 and 0.803, respectively, having a significant impact on desertification. Increasing precipitation and decreasing wind speed can alleviate desertification to some extent. The contribution rates of precipitation and the annual maximum wind speed to the principal component are 0.851 and 0.957, respectively. The land contract responsibility system implemented in 1980 and a series of ecological and environmental protection policies implemented by the state after 2000 play a key role in the Hunshandake Sandy Land switching from growth to mitigation. Therefore, in the process of desertification control, we need to implement policies of returning farmland to forest and grass and grazing prohibition and restriction to decrease the desertification of the Hunshandake Sandy Land and to promote the healthy development of the regional ecological environment.

Key words: desertification; spatial-temporal characteristics; driving mechanism; Hunshandake Sandy Land